# 气冷微堆直接透平核热耦合仿真

李云龙[1] 赵雨儿[1] 潘利[2] 张慧敏[1] 汪俊[1]
1（中国核电工程有限公司 北京 100840）
2（苏州同元软控信息技术有限公司 苏州 215123）

**摘要** 气冷微堆是一种先进的新型反应堆，由于其丰富的应用场景，近些年受到广泛关注。气冷微堆是棱柱式反应堆，使用 TRISO 燃料颗粒作为燃料，能量转换系统采用单回路的一体化氦气轮机方案，无论是反应堆设计还是采用的设备均没有积累足够的运行经验，需要对气冷微堆的运行控制进行研究。通过多物理仿真程序 Modelica 语言，对气冷微堆包括反应堆、透平机、压气机、充排系统、余热排出系统等主要系统进行建模，并制定了气冷微堆从启动到停堆的整个运行方案，采用堆芯出口温度恒定控制方案，对气冷微堆整个运行过程进行仿真分析，反应堆出口温度的偏差在 2℃以内，温度变化速率在 50℃/h 以下，反应堆周期在 60s 以上，结果表明，气冷微堆可以完成运行目标，整个运行过程各参数未超限值，验证了核热耦合运行方案的合理可行。本研究对其他气冷堆型的控制逻辑、运行方案设计以及仿真分析有一定的参考价值。

**关键词** 气冷微堆；核热耦合；反应堆运行；系统仿真；Modelica
**中图分类号** TL99

## Neutronics/Thermal-hydraulics Coupling simulation of direct turbine micro gas-cooled reactor

Li Yunlong1[1] Zhao Yuer[1] Pan Li[2] Zhang Huimin[1] Wang Jun[1]
1(*China nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China*)
2(*Suzhou Tongyuan soft & Ctrl. Technology Co., Ltd., Suzhou 215123, China*)

**Abstract** **[Background]** Micro gas-cooled reactor(MGCR) is a new type of advanced reactor, which has been widely concerned in recent years due to its rich application scenarios. The core of the MGCR is a prismatic reactor using TRISO particles as fuel, and the energy conversion system adopts a single-loop integrated helium turbine scheme. Neither the reactor design nor the equipment have not accumulated enough operation experience, so it is necessary to study the operation behavior of the MGCR. **[Purpose]** This study aims to simulate the behavior of the entire lifespan of the MGCR from startup to power operation to shutdown. **[Methods]** The main systems of the MGCR are modeling by the multi-physics simulation language Modelica, include reactor core, turbine, compressor, regulator, heat removal system and so on. The entire lifespan operation plan is formulated from startup to power operation to shutdown. The control scheme of constant outlet temperature is adopted for the simulation. The main parameters of the reactor process are simulated, such as outlet temperature, power, pressure, turbine rotation speed, reactivity, and so on. **[Results]** The MGCR is operated successfully. The deviation of outlet is within 2 ℃, the temperature change rate is below 50℃/h, the reactor period is more than 60s. The results show that, the MGCR can achieve its operation objectives. All parameters in the whole operation process don't exceed the limit value. **[Conclusions]** The operation plan of the MGCR is reasonable and feasible. This study also provide important reference for

---

中核集团集中研发项目-气冷微堆设计研发项目资助
第一作者：李云龙，男，1988 年出生，2014 年于西安交通大学获硕士学位，研究领域为反应堆物理，反应堆系统仿真
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00
Supported by Centralized Research and Development Program of China National Nuclear Corporation – Design Technique Study of Micro Gas-cooled Reactor
First author: Li Yunlong, born in 1988, graduated form Xi'an Jiaotong University with a master's degree in 2014, focusing on reactor physics and system simulation.
Received: 20XX-00-00, revised date: 20XX-00-00

the design and simulation of gas-cooled reactor.

**Key words**　Micro gas-cooled reactor, Neutronics/Thermal-hydraulics coupling, Reactor operation, System simulation, Modelica

气冷微堆是一种棱柱式高温气冷堆，其固有安全性高、灵活性好，可以为海岛、偏远地区等特殊场景提供稳定的能源[1]，近些年受到广泛关注。气冷微堆采用氦气作为冷却剂，一体化氦气轮机作为能量转换装置，由于气冷微堆热容较大，控制棒单棒价值较大，设备能承受的热冲击较小，使其在启动、停堆、升降功率等过程都与传统反应堆存在较大差异，有必要对气冷微堆的堆机耦合进行仿真分析。

本文使用多物理系统仿真 Modelica 语言平台 MWORKS 平台[2][3]进行仿真，对气冷微堆主要系统进行建模，并对反应堆启停、功率运行进行仿真分析，以验证气冷微堆控制逻辑、运行策略及气冷微堆运行方案的合理可行。

## 1　气冷微堆系统介绍

气冷微堆燃料采用 TRISO 包覆颗粒燃料，可以有效包容裂变产物，石墨作为慢化剂，整个堆芯的功率及功率密度较小。反应性由位于反射层的抽插式控制棒控制，氦气作为冷却剂[4]。

能量转换系统采用直接透平模式的氦气布雷顿循环。主要设备包括氦气透平机、回热器、预冷器、低压压气机、高压压气机、间冷器、氦气充排系统、非能动余热排除系统等，见图 1。其中氦气透平机、低压压气机、高压压气机为同轴一体化设备。

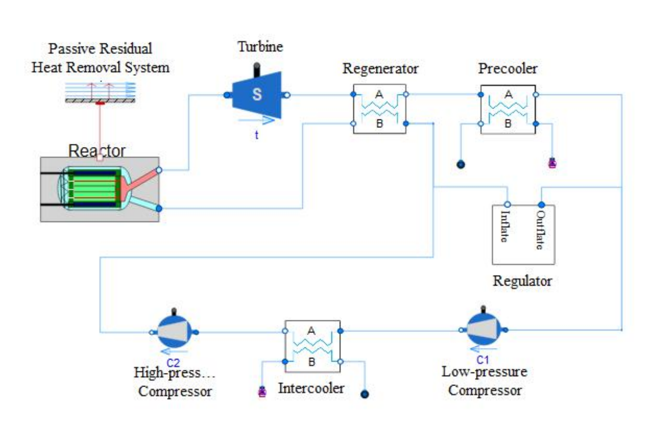



图 1　气冷微堆系统图

Fig 1 Diagram of micro gas-cooled reactor

## 2　主要仿真模型

### 2.1　反应堆模型

反应堆模型包括物理模型和热工模型。

#### 2.1.1　点堆模型

采用点堆方程[5]求解堆芯功率，假定不同时刻中子通量密度不随空间分布改变。

$$\frac{dn(t)}{dt}=\frac{\rho-\beta}{\Lambda}n(t)+\sum_{i=1}^{6}\lambda_i c_i(t)+q$$
$$\frac{dc_i(t)}{dt}=\frac{\beta_i}{\Lambda}n(t)-\lambda_i c_i(t) \tag{1}$$

其中，n(t)为中子密度，$cm^{-3}$，$c_i(t)$---第 i 组缓发中子先驱核浓度，$cm^{-3}$，为中子代时间，s。q 为核反应堆外中子源强，$s^{-1}$，q 为核反应堆外中子源强，$s^{-1}$，$\lambda_i$为第 i 组缓发中子衰变常数，$\beta_i$为第 i 组缓发中子份额，$\beta$ 为缓发中子总份额，$\beta=\sum_{i=1}^{6}\beta_i$。

#### 2.1.2　堆芯热工模型

燃料组件的能量守恒方程如式(2)所示[6]。方程左边为燃料组件温度变化引起的时变项，方程右边为传入该节点的能量，分别是燃料传递出来的热量 $Q_{fuel}$，传入氦气流道的热量 $Q_{He}$，以及组件节块在轴向和径向的热传导 $Q_{axial}$、$Q_{radial}$。

$$\rho_{f,i,k}V_{f,i,k}C_{p,i,k}\frac{dT_{block,i,k}}{dt}=Q_{fuel,i,k}-Q_{He,i,k}+Q_{radial,i-1,k}+Q_{axial,i,k-1}-Q_{axial,i,k+1}+Q_{radial,i,k,N}+Q_{radial,i,k,NW}+Q_{radial,i,k,SW}-Q_{radial,i,k,S}-Q_{radial,i,k,SE}-Q_{radial,i,k,NE} \tag{2}$$

燃料棒的能量守恒方程如式(3)，式(4)，$Q_{nuclear}$是该出燃料节点的核加热功率，$Q_{fuel}$是传递给燃料组件能量。

$$\rho_{fuel,i,k}V_{fuel,i,k}C_{pfule,i,k}\frac{dT_{fuel,i,k}}{dt}=Q_{nuclear,i,k}-Q_{Fuel,i,k} \tag{3}$$

$$Q_{Fuel,i,k}=k(T_{fuel,i,k}-T_{block,i,k}) \tag{4}$$

其中ρ为密度，V 为体积，C 为比热，K 为换热系数。氦气通过与燃料石墨基体的对流换热被加热。氦气流道的流动和传热用管道模拟。

### 2.2　能量转换系统

氦气风机包括两大类气动部件，压气机及透平机。其中，压气机提供气源动力，将原动的机械能转换成气体压力能。透平机用于给将流体介

质中的能量转换成机械能，输出机械功。

**2.2.1** 压气机

对于压气机内的气动过程，采用如下假设：1）压气机内部为定常流动；2）压气机压缩过程是绝热过程。

压比、效率和流量分别为：

$$\begin{aligned} &\pi = 1 + \left(\pi^*\left(N_{cor}, W_{cor}\right) - 1\right)\cdot C_\pi \\ &\eta = \eta^*\left(N_{cor}, W_{cor}\right)\cdot C_\eta \\ &W_{cor} = W_{cor}{}^*\left(N_{cor}, W_{cor}\right)\cdot C_W \end{aligned} \tag{5}$$

其中，π为压比，N 为转速，β为工作点位置，η为效率，W 为流量，下标 d 表示设计点，下标 cor 为相对值，上标*为通用特性曲线相应参数，见图 2。

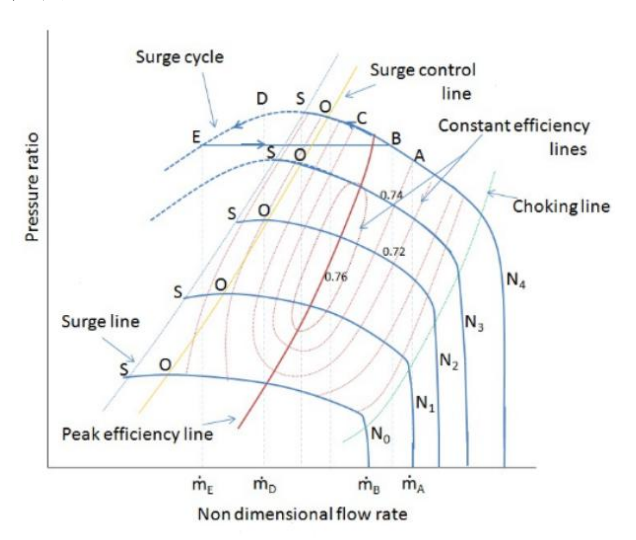



图 2 压气机的通用特性曲线

Fig.2 General Characteristic Curve of the Compressor

**2.2.2** 透平机

对于透平机气动过程，假设：1）压气机内部为定常流动；2）压气机压缩过程是绝热过程。相比于压气机，透平涡轮的气动过程相对简单，本文对透平流量进行相似描述：

$$\frac{G_T}{G_{T0}} = \sqrt{\frac{T_{30}^*}{T_3^*}}\cdot\sqrt{1-\frac{0.4\Delta n}{n_0}}\cdot\sqrt{\frac{p_3^{*2}-p_4^{*2}}{p_{30}^{*2}-p_{40}^{*2}}} \tag{6}$$

$G_T$、$G_{T0}$分别为实际流量和额定流量，$T_{30}^*$、$T_3^*$分别为额定透平入口滞止温度和实际透平入口滞止温度，$p_{30}^*$、$p_3^*$分别为额定透平入口滞止压力和实际透平入口滞止压力，$p_{40}^*$、$p_4^*$分别为额定透平出口滞止压力和实际透平出口滞止压力，$\Delta n$、$n_0$分别为转速偏离额定转速的量和额定转速值。

对于透平效率，采用式(7)，式(8)进行计算，其中，$n$ 为实际转速。

$$\eta = [1-0.4(1-\frac{n}{n_0})^2](2q-q^2) \tag{7}$$

$$q = \frac{n\cdot G_{T0}}{n_0\cdot G_T} \tag{8}$$

**2.3 控制方案简介**

气冷微堆堆机协调控制主要分为反应堆堆芯出口温度控制和透平转速控制。

**2.3.1** 出口温度控制

气冷微堆本身具有较大的热容，温度反应较慢。同时由于气冷微堆体积较小，控制棒驱动机构布置数量有限，控制棒的数量也较少，导致了控制棒单棒价值较大，控制难度较高。同时，气冷微堆为新型堆，很多设备的研究不充分，很多设备没有经过工程实际的检验，不易承担较大的热冲击，温度变化率不易太大。

因此，气冷微堆采用反应堆出口氦气温度恒定控制方案，该方案可以避免出口温度上升对反应堆结构热应力限制的影响[7]。见图 3。

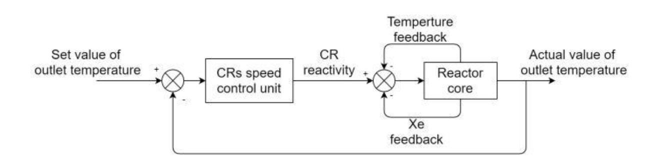



图 3 出口温度控制原理图

Fig.3 Control schematic diagram of outlet temperature

采用堆芯冷却剂出口的温差信号作为驱动控制棒动作的信号，以调节控制棒以不同棒速进行动作。

$$L = K\left[\left(T_o - T\right) + \frac{1}{\tau}\int\left(T_o - T\right)dt\right] \tag{9}$$

其中 K 为转换系统；$T_o$为出口温度定值信号，T 为出口温度测量信号，τ 为积分时常数。L 为驱动控制棒动作信号。

2.3.2 压力控制

气冷微堆在透平发电后端，采用了蓄电池作

为能源管理系统，蓄电池作为虚拟负载，相当于增加了一个可变负载，通过变频器调节蓄电池的功率输出输入，进而调节透平转速，响应速度较快。由于变频器响应速度很快，透平转速基本维持不变。

因此，稳态运行时，通过蓄电池的充放电，调节负载的微小变化，而当负载发生较大变化时，通过氦气充排系统，调节回路中的压力。

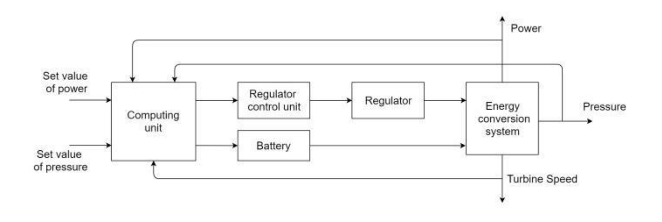



图 4　压力控制原理图

Fig.4 Control schematic diagram of pressure

## 3　运行方案

为验证气冷微堆运行方案的合理性，模拟了气冷微堆的启动过程[8][9]，功率运行过程以及停堆过程。由于本文主要对堆机耦合进行分析，仿真过程中，忽略反应堆达临界的过程，假设初始状态为达临界零功率状态。参数限值见表 1。

初始状态时，回路中充有少量氦气，氦气透平机为低转速，间冷器和预冷器以投入使用，然后逐步提升控制棒以提升反应堆功率，使反应堆至热态，接着提高氦气透平机转速至额定转速，待动作完成后提升控制棒使反应堆功率逐渐提升至氦气透平机自持功率，切换至发电模式，继续提升控制棒至厂用电水平（30%FP）。最后通过堆机协调控制，将反应堆功率提升至额定功率。停堆流程基本与启堆过程相反。具体流程见图 5。

**表 1　主要运行参数限值**

**Table 1 Main operating parameter limits**

| 参数名称 Parameter | 数值 Value |
|---|---|
| 反应性 Reactivity | <0.5$\beta$ |
| 堆芯出口温度变化速率 Temperature change rate of reactor outlet | <50℃/h |
| 控制棒动作死区 Dead zone of CRs action | 2℃ |
| 控制棒棒速 Speed of CRs | >1cm/s |
| 反应堆功率变化 Power change rate of reactor | <5%FP/min |
| 反应堆周期 Reactor period | >60s |

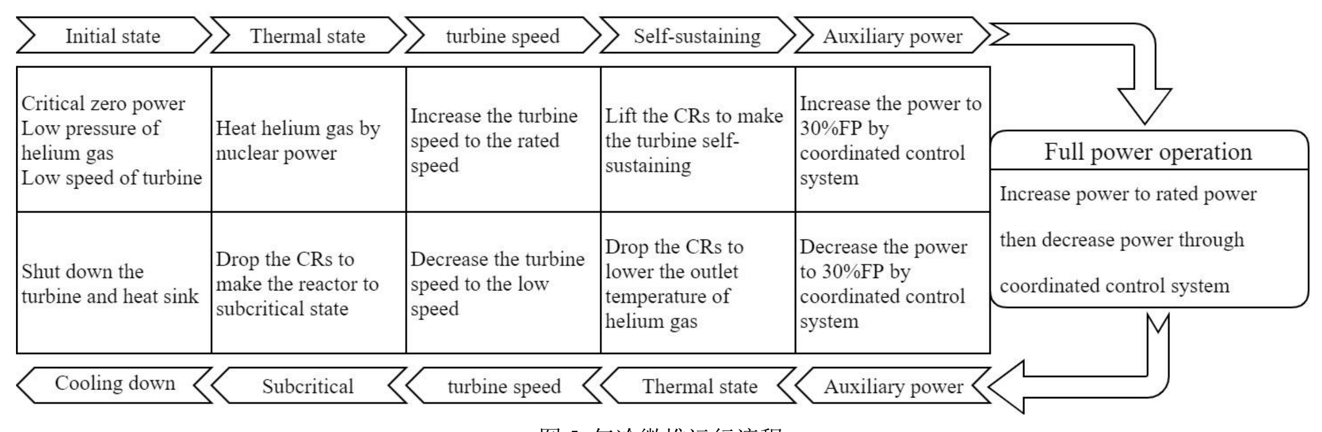



图 5　气冷微堆运行流程

Fig.5 Operation process of micro gas-cooled reactor

## 4　仿真结果

由于气冷微堆堆芯尺寸较小，堆芯功率空间分布较为均匀，在仿真中不考虑堆芯功率空间分布的影响，也忽略控制棒间的干涉效应。同时，在反应堆设计中添加了可燃毒物棒，随着反应堆的运行，可燃毒物的消耗也基本抵消了反应堆的燃耗效应，仿真中也不考虑反应堆的燃耗影响。

采用 Modelica 语言搭建了气冷微堆仿真模

型，依照运行方案进行仿真计算，主要参数计算结果见图 6，图中①②③为启堆过程，④⑤⑥为功率运行过程，⑦⑧⑨⑩为停堆过程，⑪为长期冷却过程。

图中分别列示了反应堆出口温度、控制棒步数、反应堆入口压力、反应堆功率、透平转速以及反应性 6 个主要参数随着运行进程的变化规律。其中：

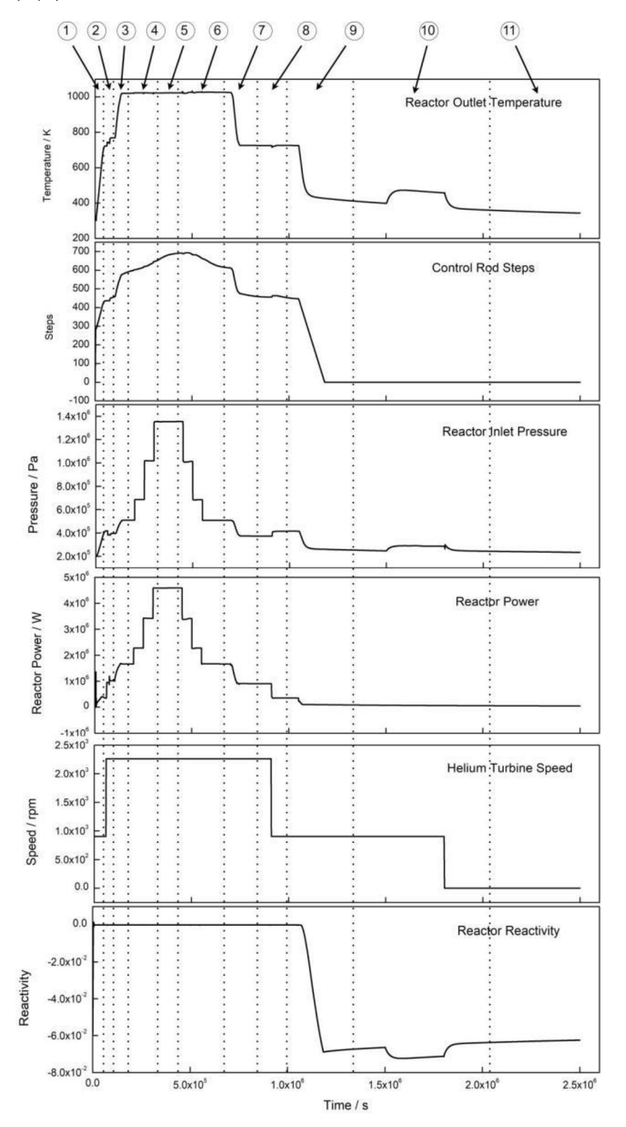



图 6 主要参数仿真结果

Fig.6 Simulation results of main parameters

①为核加热过程，提升控制棒，依靠反应堆功率加热回路中的氦气，此时，间冷器和预冷器已投入使用。

②为提升转速过程，将氦气风机转速从低转速提升到额定转速，会使氦气流量增加，带热能力增强，使反应堆氦气平均温度下降，由于温度负反馈的作用，反应堆功率有所提升，堆芯出口温度略有升高。

③为提升功率至厂用电水平（30%FP）过程，此过程依靠提升控制棒来提升功率，使反应堆功率达到 30%额定功率，同时反应堆出口温度达到额定温度，在此过程中，氦气风机从用电模式切换为发电模式。

④为功率提升过程，此过程采用堆芯出口温度恒定控制方案，通过堆机协调控制，调节控制棒棒位和氦气压力，提升反应堆功率，在提升过程中，设置 50%FP 和 75%FP 两个中间功率台阶。

⑤为额定功率运行过程，此阶段反应堆保持额定功率运行，由于反应堆存在一定散热以及氙毒的积累，在此阶段会比较缓慢的提升控制棒，抵消此部分的影响，维持反应堆出口温度恒定。

⑥为降功率过程，此过程类似提升功率过程，通过堆机协调控制，维持反应堆出口温度恒定，降低反应堆功率至 30%额定功率，同样设置 75%FP 和 50%FP 两个中间功率台阶，但由于在降功率过程中，氙浓度会出现一定程度上升[10][11]，引入负反应性，因此落棒的速率较提升功率过程提棒的速率低。

⑦为降低堆芯出口温度过程，此过程中，通过落棒降低反应堆出口温度，由于反应堆功率的降低，氦气风机会从发电模式转换为用电模式。

⑧为降低转速过程，将氦气风机的转速降为低转速，由于流量的降低，反应堆入口压力略有升高，此过程中，反应堆依然处于临界状态，随时可以再启动。

⑨为次临界过程，通过落棒使反应堆处于次临界状态，反应堆裂变功率基本消失，反应堆出口温度下降，但此时反应堆温度依然较高，氦气风机转速和热肼不能关停。

⑩为关停反应堆过程，当反应堆参数满足条件后，关掉氦气风机和热肼，会导致温度有所升高。

⑪为长期冷却过程，由于衰变热的长期存在，依靠非能动余热排出系统持续导出衰变热。

通过对运行策略的仿真模拟，整个运行过程满足表 3 的限值要求，由于气冷微堆具有较大的热容量，堆芯出口温度变化率<50℃/h 的限值，使控制棒动作速率较低，反应性引入较为缓慢，反应堆周期较长，升功率部分阶段反应堆周期见图 7，满足>60s 的要求。

## 5 结语

气冷微堆由于具有较大的热容量、较大的单

棒价值，较小的温度变化限值，对堆机协调运行提出了挑战。本文通过对气冷微堆主要系统进行分析，建立了气冷微堆包括反应堆、氦气风机、压气机和氦气充排系统等主要系统设备的仿真模型，制定了气冷微堆控制逻辑和运行策略，对气冷微堆从启堆到功率运行再到停堆的过程进行了仿真模拟，对各个不同阶段主要参数的变化进行分析。

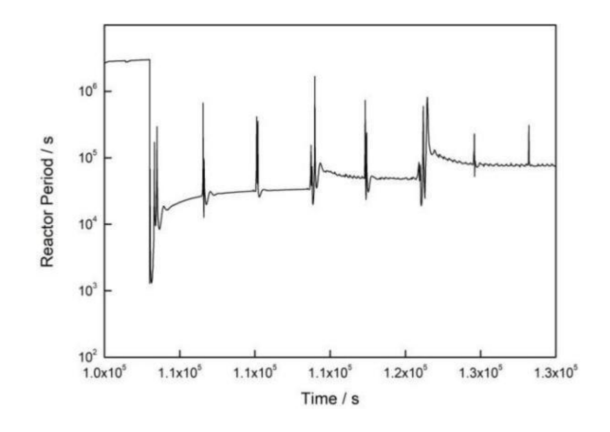



图 7 升功率阶段反应堆周期

Fig.7 Reactor period of power-up process

结果表明控制逻辑和运行策略可以满足气冷微堆运行要求，主要参数均在运行限值之内。本研究验证了气冷微堆直接透平核热耦合运行方案合理可行，对其他机型控制逻辑、运行策略的设计及仿真模拟计算也提供了参考。

## 参考文献

1 苏怡慧，张刚和，易珂，等. 气冷微堆运行场景分析[J]. 科技视界，2024，17：54-56.
Su Yihui, ZhangGanghe, Yike, *et al*. Analysis of operational scenarios for micro gas-cooled reactor[J]. Science & Technology Vision, 2024, 17: 54-56.

2 陈立平，周凡利，丁建完，等. 多领域物理统一建模语言 Modelica 与 MWorks 系统建模[M]. 武汉：华中科技大学出版社，2019.
Chen Liping, Zhou Fanli, Ding Jianwan, *et al*. The unified multi-domain physical modeling language modelica and systems modeling application with Mwork[M]. Wuhan: Huazhong Science and Technology University Press, 2019.

3 周凡利. 工程系统多领域统一模型编译映射与仿真求解研究[D]. 武汉：华中科技大学，2011.
Zhou Fanli. Study on compilation mapping and simulation solution of unified model in multiple fields of engineering system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

4 张成龙，刘国明，贺楷，等. 气冷微堆燃料设计的中子学特性影响研究[J]. 原子能科学技术，2021，55(11)：2060-2069.
Zhang Chenglong, Liu Guoming, He Kai, *et al*. Research on influence of neutronics characteristics in fuel design of micro gas-cooled reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(11): 2060-2069.

5 谢仲生. 核反应堆物理分析[M]. 西安：西安交通大学出版社. 2003.
Xie Zhongsheng. Analysis of nuclear reactor physics[M]. Xian: Xian Jiaotong University Press. 2003.

6 Zhang H, Li Y, Zhao Y, Wang J, Du S and Ma W(2023). Modeling and simulation of a micro gas-cooled nuclear reactor using Modelica. *Fron. Energy Res*. 11:1206755. doi: 10.3389/fenrg.2023.1206755.

7 张建民. 核反应堆控制[M]. 西安：西安交通大学出版社. 2002.
Zhang Jianmin. Control of nuclear reactor[M]. Xian: Xian Jiaotong University Press. 2002.

8 刘丹，孙俊，徐小琳，等. 高温气冷堆启动过程的模拟与分析[J]. 原子能科学技术，2014，45(增)：594-598.
Liu Dan, Sun Jun, Xu Xiaolin, *et al*. Simulation and analysis of start-up process of high temperature gas-cooled reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 45(sup): 594-598.

9 司天琪，杜宇，易珂，等. 气冷微堆自启停运行方案研究[J]. 核动力工程，2024，45(S1)：58-62.
Si Tianqi, Du Yu, Yi Ke, *et al*. Study on automatic plant startup and shut down operation schemme for gas-cooled micro reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2024, 45(S1): 58-62.

10 周波，严睿，邹杨，等. 熔盐堆主回路系统氙的动力学特性研究[J]. 核动力工程，2018，39(5)：15-20.
Zhou Bo, Yan Rui, Zou Yang, *et al*. Analysis of xenon dynamic characteristics in primary loop system of MSR[J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(5): 15-20.

11 左彦慈，李建龙，王玉林，等. 研究堆碘坑反应性计算方法评价[J]. 核电子学与探测技术，2020，40(3)：443-447.

Zuo Yanci, Li Jianlong, Wang Yulin, *et al*. The evaluation of the calculation method about Idoine pit reactivity on research reactor[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2020, 40(3): 443-447.